

УДК 621.787:539.319

Павлов В.Ф., Букатый А.С., Филатов А.П., Костичев В.Э.

## УЧЁТ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРЕДЕЛ ВЫНОСЛИВОСТИ ДЕТАЛЕЙ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Основную роль в повышении сопротивления усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений играют сжимающие остаточные напряжения [1]. Для учёта влияния остаточных напряжений на предел выносливости таких деталей применяются два критерия. Первым критерием являются остаточные напряжения на поверхности концентратора. Зависимость для определения приращения предела выносливости  $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$  упрочнённой детали в этом случае имеет вид

$$\Delta P_R = \psi_P \cdot \left| \sigma_z^{нов} \right|, \quad (1)$$

где  $\psi_P(\psi_\sigma, \psi_\tau)$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\sigma_z^{нов}$ ,  $\sigma_z^{нов}$  – осевые (меридиональные) остаточные напряжения на поверхности концентратора опасного сечения детали.

Для определения второго критерия в работе [2] использовалось решение задачи [3] о дополнительных остаточных напряжениях в наименьшем сечении поверхностно упрочнённой детали после нанесения на неё надреза полуэллиптического профиля. Выделив основную часть решения [3], был получен второй критерий  $\bar{\sigma}_{ост}$  – критерий среднеинтегральных остаточных напряжений в виде:

$$\bar{\sigma}_{ост} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi, \quad (2)$$

где  $\sigma_z(\xi)$  – осевые остаточные напряжения в опасном сечении детали;  $\xi = y/t_{кр}$  – расстояние от дна концентратора до текущего слоя, выраженное в долях  $t_{кр}$  (рисунок 1);  $t_{кр}$  – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей при работе детали (образца) на пределе выносливости.

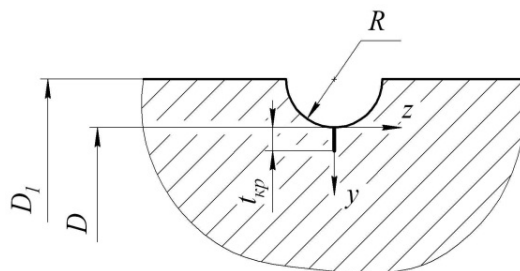


Рисунок 1 – Опасное сечение детали и нераспространяющаяся трещина усталости

Приращение предела выносливости  $\Delta P_R(\Delta\sigma_R, \Delta\tau_R)$  упрочнённой детали при использовании критерия  $\bar{\sigma}_{ост}$  определяется по следующей формуле:

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_P \cdot |\bar{\sigma}_{ост}|, \quad (3)$$

где  $\bar{\psi}_P(\bar{\psi}_\sigma, \bar{\psi}_\tau)$  – коэффициент влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

В работе [4] для упрочнённых различными методами деталей и образцов из различных материалов с различными концентраторами напряжений при растяжении-сжатии, изгибе и кручении было экспериментально установлено, что критическая глубина  $t_{кр}$  нераспространяющейся трещины усталости зависит только от размеров опасного поперечного сечения и для цилиндрических деталей определяется соотношением:

$$t_{кр} = 0,0216 D, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр опасного сечения детали (рисунок 1).

В настоящем исследовании гладкие образцы из стали 20 диаметром  $D1=50$  мм подвергались обкатке роликом при усилиях  $P = 0,5$  кН (ОР1) и  $P = 1,0$  кН (ОР2). Затем на упрочнённые и неупрочнённые гладкие образцы наносились круговые надрезы полукруглого профиля радиусов  $R = 0,3$  мм,  $R = 0,5$  мм и  $R = 1,0$  мм.

Остаточные напряжения в гладких образцах определялись методом колец и полосок. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  гладких образцов представлено на рисунке 2, а. Можно видеть, что сжимающие остаточные напряжения и глубина их залегания с увеличением усилия обкатки возрастают.

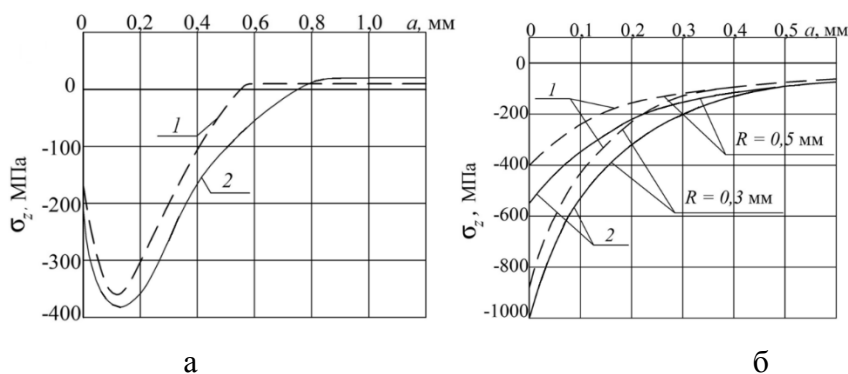


Рисунок 2 – Осевые  $\sigma_z$  остаточные напряжения в упрочнённых гладких образцах (а) и в образцах с надрезами (б) после: 1 – ОР1; 2 – ОР2

Остаточные напряжения в образцах с надрезами определялись расчётным путём – суммированием дополнительных остаточных напряжений за счёт перераспределения остаточных усилий после опережающего поверхностного пластического деформирования и остаточных напряжений гладких образцов. При этом дополнительные остаточные напряжения вычислялись как аналитическим [3], так и численными методами. Распределение осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений по толщине поверхностного слоя  $a$  в наименьшем сечении образцов с надрезами  $R = 0,3$  мм и  $R = 0,5$  мм приведено на рисунке 2, б, а значения остаточных напряжений на поверхности дна надрезов  $\sigma_z^{\text{пов}}$  представлены в таблице 1.

Испытания на усталость при изгибе в случае симметричного цикла неупрочнённых и упрочнённых образцов с надрезами и напрессованной втулкой проводились на машине УМП-02; база испытаний –  $3 \cdot 10^6$  циклов нагружения. Результаты определения предела выносливости  $\sigma_{-1}$  образцов представлены в таблице 1. Упрочнённые образцы, выстоявшие базу испытаний при напряжении, равном пределу выносливости, доводились до разрушения при больших напряжениях. На изломах этих образцов были обнаружены нераспространяющиеся трещины усталости, критическая глубина  $t_{кр}$  которых соответствует зависимости (4) и приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов с надрезами и напрессованной втулкой на усталость и определения остаточных напряжений

Концентратор	Неупроч. образцы $\sigma_{-1}$ , МПа	Упрочнённые образцы							$K_\sigma$	$(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$
		обработка	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_z^{\text{пов}}$ , МПа	$\psi_\sigma$	$t_{кр}$ , мм	$\bar{\sigma}_{ост}$ , МПа	$\bar{\psi}_\sigma$		
надрез $R = 0,3$ мм	87,5	ОР1	117,5	-898	0,033	1,040	-94	0,322	2,86	0,328
		ОР2	130	-1004	0,042	1,110	-128	0,332		
надрез $R = 0,5$ мм	92,5	ОР1	122,5	-396	0,078	1,077	-82	0,366	2,47	0,353
		ОР2	132,5	-547	0,073	1,024	-112	0,357		
надрез $R = 1,0$ мм	92,5	ОР1	110	-126	0,139	1,073	-46	0,380	2,32	0,363
		ОР2	115	-166	0,136	1,035	-62	0,363		
напрессованная втулка	87,5	ОР1	107,5	-180	0,111	1,02	-64	0,313	2,97	0,321
		ОР2	112,5	-170	0,147	1,14	-82	0,305		

Из представленных в таблице 1 данных видно, что учёт влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости образцов по первому критерию  $\sigma_z^{\text{пов}}$  – остаточным напряжениям на поверхности концентратора – приводит к значительному рассеянию коэффициента  $\psi_\sigma$ . Этот коэффициент в проведённом исследовании изменяется в широких пределах: от 0,033 до 0,147, то есть изменяется в 4,5 раза, что неприемлемо для прогнозирования предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей. Учёт влияния поверхностного упрочнения по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  приводит к существенно

мёншему рассеянию соответствующего коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$ , который в проведённом исследовании изменяется от 0,305 до 0,380, составляя в среднем 0,342.

В работе [5] на основании многочисленных экспериментов была установлена зависимость между коэффициентом влияния  $\bar{\psi}_\sigma$  поверхностного упрочнения на предел выносливости при изгибе по критерию  $\bar{\sigma}_{ост}$  и эффективным коэффициентом концентрации напряжений  $K_\sigma$  в виде:

$$(\bar{\psi}_\sigma)_{расч} = 0,514 - 0,065K_\sigma. \quad (5)$$

В таблице 1 приведены значения коэффициента  $K_\sigma$ , а также расчётные величины коэффициента  $(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$ . Из приведённых данных видно, что опытные значения коэффициента  $\bar{\psi}_\sigma$  для каждого радиуса надреза и напессованной втулки незначительно отличаются от расчётных значений  $(\bar{\psi}_\sigma)_{расч}$ , вычисленных по формуле (5).

Таким образом, проведённое исследование показало, что для прогнозирования приращения предела выносливости поверхностно упрочнённых образцов (деталей) с концентраторами напряжений наиболее оправдано использование критерия среднеинтегральных остаточных напряжений  $\bar{\sigma}_{ост}$ .

### Библиографический список

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.
2. Павлов, В.Ф. О связи остаточных напряжений и предела выносливости при изгибе в условиях концентрации напряжений [Текст] / В.Ф. Павлов // Известия вузов. Машиностроение. – 1986. – №8. – С. 29-32.
3. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений на выносливость образцов с надрезом [Текст] / С.И. Иванов, М.П. Шатунов, В.Ф. Павлов // Вопросы прочности элементов авиационных конструкций. – Куйбышев: КуАИ. – 1974. – Вып.1. – С. 88-95.
4. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулук. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.
5. Кирпичёв, В.А. Прогнозирование предела выносливости поверхностно упрочнённых деталей при различной степени концентрации напряжений [Текст] / В.А. Кирпичёв, А.С. Букатый, А.П. Филатов, А.В. Чирков // Вестник УГАТУ. – 2011. – Т.15. – №4 (44). – С. 81-85.